

## ЛИТЕРАТУРА

1. Губин, С.П. / С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю.Юрков // Успехи химии 74, 6, 2005.
2. Gubin, S. // Magnetic Nanoparticles, ed. S. Gubin. Weinheim, Springer, 2009.
3. Петров, Ю.И. // Физика малых частиц, Москва, Наука, 1982.
4. K. C. Hwang // J. Phys. D: Appl. Phys., 43, 374001 (2010).
5. Han, S. / S. Han, Y. Yun, K.W. Park et al. // Adv. Mater., 15, 1922, 2003.
6. Guskos, N. / N. Guskos, E.A. Anagnostakis, A. Guskos // J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 24, 26, 2007.
7. Singh, V. / V. Singh, M. S. Seehra, F. E. Huggins, N. Shah, and G. P. Huffman // J. Appl. Phys. 109, 07B506, 2011.
8. Манукян, А.С. / А.С. Манукян, А.А. Мирзаханян, Т.К. Хачатрян, Г.Р. Бадалян, К.Г.Абдулвахидов, Л.А. Бугаев, Э.Г. Шароян // Изв. НАНАрмении, Физика, 45, 442, 2012.
9. Беленков, Е.А. / Е.А. Беленков // Кристаллография 44, 808, 1999.

## ПОЛУЧЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ХАЛЬКОГЕНИДОВ ВИСМУТА И СУРЬМЫ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ

**М. В. Меженный<sup>1</sup>, В. Т. Бублик<sup>2</sup>, М. Г. Лаврентьев<sup>3</sup>, В. Б. Освенский<sup>3</sup>,  
А. И. Простомолотов<sup>4</sup>, Н. Ю. Табачкова<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup>ОАО «ОПТРОН», <sup>2</sup>НИТУ «МИСЦ», <sup>3</sup>ОАО «ГИРЕДМЕТ», <sup>4</sup>ИПМех РАН,  
mvmezh@gmail.com

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционно получение термоэлектрических материалов (ТЭМ) осуществлялось преимущественно методами кристаллизации из расплава. Вместе с тем весьма технологичен и перспективен метод горячей экструзии, который позволяет получать стержни термоэлектрического материала нужной конфигурации и с достаточно высокими механическими и термоэлектрическими свойствами [1].

С учетом преимущества методов экструзии (высокая производительность) и нанотехнологии (высокая термоэлектрическая эффективность материала) представляет несомненный интерес возможность получения экструдированных стержней с использованием исходной смеси микро- и нанопорошков. Поскольку экструзия обычно проводится при достаточно высоких температурах, структура экструдированного материала является результатом пластической деформации с участием нескольких систем скольжения, в результате которого формируется текстура деформации.

В данной работе проведено исследование зависимости термоэлектрических свойств экструдированного материала на основе твердых растворов халькогенидов висмута и сурьмы от степени текстурированности (благоприятной ориентации) при различных коэффициентах вытяжки.

### ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ СМЕСИ МИКРО- И НАНОПОРОШКОВ

Синтез термоэлектрических материалов р-типа проводимости осуществляли прямым сплавлением исходных компонентов в кварцевых ампулах. Полученные слитки подвергали механоактивационной обработке в планетарной шаровой мельнице РМ-

400. Одним из факторов, ухудшающих термоэлектрические свойства ТЭМ, является взаимодействие материала с кислородом, т.е. окисление. Поэтому все операции с порошками проводили в инертной среде в перчаточном боксе.

Поскольку свойства объемного материала в большой мере зависят от его структуры на микро- и наноуровне, проведено исследование структуры полученного нанопорошка методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Bruker D8 с использованием  $\text{CuK}\alpha$  излучения, а также методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEM 2100 высокого разрешения. Частицы порошка твердого раствора  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ , полученного из исходного синтезированного материала, были однофазные и сохраняли состав исходного материала. Средний размер частиц порошка, определенный по данным просвечивающей электронной микроскопии, составил 10 - 12 нм, что совпадает с размером областей когерентного рассеяния (ОКР), определенным по уширению рентгеновских линий. Фракцию 100 - 200 мкм используют в смеси «микро-нано» в качестве микронного порошка.

Процесс получения смеси микро- и нанопорошков проводили в планетарной шаровой мельнице. Были приготовлены смеси «микро-нано» в следующих процентных соотношениях (вес.% «микро»/вес.% «нано»): 1) 80/20; 2) 70/30; 3) 60/40. Для проведения процесса горячей экструзии использовали 250-тонный пресс.

### **ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЯЖКИ НА СВОЙСТВА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

На полученных образцах проводили измерение термоэлектрических свойств методом Хармана (см. таб. 1, где для сравнения добавлены результаты для образца, полученного из порошка микронного размера).

*Таблица 1*

**Термоэлектрические свойства экструдированных стержней  
диаметром 20 мм р-типа, полученных из смеси микро- и нанопорошков**

№ образца	Состав смеси	$\alpha$ , мкВ/К	$\sigma$ , 1/(Ом·см)	$k$ , В/мК	$Z$ , 1000/К
Э-1	100% микро	215	1010	1.40	3.3
ЭНС-1	80% микро – 20% нано	227	950	1.39	3.5
ЭНС-2	70% микро – 30% нано	232	795	1.35	3.1
ЭНС-3	60% микро – 40% нано	236	580	1.30	2.6

Электропроводность экструдированных образцов, полученных из смеси микро и нанопорошков, падает по мере роста содержания нанокон компонента, а термоэдс растет. Это вызвано тем, что электропроводности микро- и нанокон компонентов сильно отличаются (для микрокомпонента она почти в два раза выше). Поэтому термоэдс нанокон компонента выше термоэдс микрокомпонента. Это можно объяснить различным уровнем концентрации носителей заряда (дырок) в микро- и нанокон компонентах: в процессе дробления материала появляются дефекты, имеющие донорную природу, и чем меньше размер частиц порошка, тем сильнее проявляется донорное действие дефектов (тем выше термоэдс и меньше электропроводность).

Измерение механических свойств проводились на образцах размером  $2.4 \times 2.4 \times 6 \text{ мм}^3$ , вырезанных как в направлении экструзии, так и перпендикулярно ему, в интервале температур 293–623 К. Анализ результатов испытаний показал, что механическая прочность при комнатной температуре составляет не менее 150 МПа.

Условия экструзии - форма фильеры, температура и скорость деформации, величина деформации, структура исходной заготовки – влияют на конечную структуру и свойства экструдированного материала. В принципе, поликристаллический материал при произвольной ориентации его зерен макроскопически изотропен. Однако, если в результате пластической деформации при экструзии формируется текстура (деформации или рекристаллизации), то материал становится макроскопически анизотропным. Контроль текстуры при различных условиях экструзии и является первой задачей рентгенодифракционного исследования влияния условий экструзии на структурные характеристики материала. В настоящей работе отдано предпочтение характеристизации текстуры с помощью обратных полюсных фигур. В этом случае можно сравнивать результаты экструзии при разных параметрах технологического процесса количественно, сравнивая структурные изменения со свойствами (таб. 2).

Таблица 2

**Зависимость термоэлектрических свойств экструдированного материала от степени вытяжки и текстуры**

№	Коэфф. вытяжки	Диаметр стержня, мм	Текстура, %	$\alpha$ , мкВ/К	$\sigma$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	$\kappa$ , Вт/см·К	$Z \cdot 10^3$ , К <sup>-1</sup>
1	28	5*5 мм <sup>2</sup>	41	212.9	997.5	1.27	3.4
2	44	1,5	47	227.3	767.7	1.23	3.2
3	9	10	43	216.1	859.5	1.16	3.4
4	8	30	51	204.4	1130.9	1.42	3.3
5	18	20	53	205.2	982.0	1.24	3.3

В исходной пресс-заготовке наблюдается текстура укладки, при которой плоскости спайности параллельны поверхности образца, т.е. перпендикулярны направлению экструзии. В переходной области фильеры происходит переориентация и начинает формироваться другая текстура. Пластическое течение начинается быстрее в середине стержня, ближе к оси экструзии [2].

На выходе из фильеры формируется текстура деформации преимущественно (11-20) и (10-10), ось зоны которых параллельна оси экструзии, плоскости спайности при этом тоже располагаются вдоль оси экструзии. Далее по длине экструдированного стержня текстура и микроструктура принципиально не меняются. Параллельно с

формированием аксиальной текстуры наблюдается постепенное исчезновение пористости, присутствующей в пресс-заготовке.

Возникшая при экструзии текстура деформации хорошо выражена и составляет около 50 %. Сравнение текстур образцов, экструдированных с различными коэффициентами вытяжки, показало, что существенной разницы текстур нет. Из сравнения обратных полюсных фигур можно сделать заключение, что с точки зрения образования благоприятной текстуры можно считать коэффициент вытяжки 18 предпочтительным. Максимальное значение добротности ( $Z=3,4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ) достигается на образцах 1 и 3 (коэффициенты вытяжки 28 и 9 соответственно).

### ВЫВОДЫ

Образцы термоэлектрического материала  $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}\text{Te}_3$  получены методом горячей экструзии. Исследован процесс получения экструдированного материала из смеси микро- и нанопорошков. Изучено влияние коэффициента вытяжки на свойства термоэлектрического материала. С помощью металлографических и рентгенодифрактометрических методов исследовано изменение структуры и текстуры по длине экструдированного стержня. На экструдированных образцах проведены измерения механических и термоэлектрических свойств. Результаты исследований механических (прочность не менее 150 МПа) и термоэлектрических характеристик (термоэлектрическая эффективность  $Z=3,5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ) ТЭМ р-типа при комнатной температуре показали, что свойства полученного экструдированного материала соответствуют современному мировому уровню.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сабо, Е.П. Технология халькогенидных термоэлементов. Повышение термоэлектрической эффективности / Е.П. Сабо // Термоэлектричество. 2000. № 4. С. 49 – 57.
2. Лаврентьев, М.Г. Расчетно - экспериментальное исследование формирования структуры термоэлектрического материала на основе твердых растворов халькогенидов висмута и сурьмы, полученных методом горячей экструзии / М.Г.Лаврентьев [и др.] // Термоэлектричество. 2012. № 4. С.36-42.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В КРЕМНИЕВЫХ МОП-СТРУКТУРАХ

**В. Н. Мищенко**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
mishchenko@bsuir.by*

Исследование электронного транспорта в кремниевых МОП-транзисторах с формированием границы раздела Si/SiO<sub>2</sub>, которое приводит к появлению двумерного электронного газа, вызывает особый интерес, связанный с улучшением выходных параметров приборов диапазонов СВЧ и КВЧ. Для анализа процессов переноса электронов в полупроводниковых приборах с квантовыми ямами обычно используется процедура решения уравнения Шредингера совместно с решением уравнения Пуассона [1, 4]. Применяя метод Монте-Карло, можно исследовать процессы переноса электронов в различных областях полупроводниковой структуры. Известно, что при